

mació dels anomenats cristalls de raïm en algunes molècules i col·loides que interactuen via forces repulsives efectives (Mladek *et al.*, 2006; Likos *et al.*, 2007; Delfau *et al.*, 2016). La formació de patrons en aquests sistemes tan dispars comparteix algunes propietats: la competència indueix una distribució hexagonal dels grups i la transició als patrons està controlada matemàticament pel signe de la transformada de Fourier de la funció nuclear. Aprofundir en la generalitat d'aquestes propietats de l'agrupament induït per repulsió/competència és un dels grans reptes d'aquest camp.

En conjunt, aquest compendi de sistemes mostra que patrons aparentment idèntics poden emergir en diferents escenaris i com a

conseqüència de diferents interaccions. Això és especialment important des d'un punt de vista ecològic, ja que els patrons que semblen idèntics, però que provenen de diferents mecanismes, poden tenir conseqüències totalment diferents a nivell de l'(eco)sistema que requeririen estratègies de gestió completament diferents.

Agraïments

Donem les gràcies als nostres estrets col·laboradors Justin M. Calabrese i Emilio Hernández-García. També agraïm a Corina E. Tarnita, Federico Vázquez, Damià Gomila, Miguel Ángel Muñoz i Juan A. Bonachela que ens han cedit informació i col·laboracions sobre

aquests temes i altres de relacionats. Finalment, agraïm a Òscar Guadayol i Mariona Segura la traducció del manuscrit original al català. RMG és becari postdoctoral de Life Sciences Research Foundation. Aquest treball està finançat per la Fundació Gordon & Betty Moore a través de la subvenció GBMF2550.06 a RMG i el Ministeri d'Economia i Competitivitat i Fons Europeu de Desenvolupament Regional a través del projecte CTM2015-66407-P (MINECO/FEDER) a CL.

Bibliografia

ALONSO, D. [*et al.*] (2002). «Mutual interference between predators can give rise to turing spatial patterns». *Ecology*, 83(1): 28–34.

DE ANGELIS, D. L.; YÜREK, S. (2017). «Spatially Explicit Modeling in Ecology: A Review». *Ecosystems*, 20: 284–300.

BAILEY, R. M. (2011). «Spatial and temporal signatures of fragility and threshold proximity in modelled semi-arid vegetation». *Proc. R. Soc. London Ser. B*, 278(1708): 1064–1071.

BARBIER, N. [*et al.*] (2008). «Spatial decoupling of facilitation and competition at the origin of gapped vegetation patterns». *Ecology*, 89(6): 1521–1531.

BIRCH, D. A.; YOUNG, W. R. (2006). «A master equation for a spatial population model with pair interactions». *Theor. Popul. Biol.*, 70(1): 26–42.

BONACHELA, J. A. [*et al.*] (2015). «Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climatic change». *Science*, 347(6222): 651–655.

BORGOGNO, F. [*et al.*] (2009). «Mathematical models of vegetation pattern formation in ecohydrology». *Rev. Geophys.*, 47(1), 1–36.

BUTLER, T.; GOLDENFELD, N., (2009). «Robust ecological pattern formation induced by demographic noise». *Phys. Rev. E*, 80(3): 30902.

COUZIN, I. D. [*et al.*] (2002). «Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups». *J. Theor. Biol.*, 218(1): 1–11.

COUZIN, I. D.; KRAUSE, J., 2003. «Self-Organization and Collective Behavior in Vertebrates». *Advan. Study Behav.*, 32: 1–75.

D'ODORICO, P. [*et al.*] (2006a). «Patterns as indicators of productivity enhancement by facilitation and competition in dryland vegetation». *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 111(3): 1–7.

D'ODORICO, P. [*et al.*] (2006b). «Vegetation patterns induced by random climate fluctuations». *Geophys. Res. Lett.*, 33(19): L19404.

DEBLAUWE, V. [*et al.*] (2008). «The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns». *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 17(6): 715–723.

DELFAU, J. B. [*et al.*] (2016). «Pattern formation with repulsive soft-core interactions: Discrete particle dynamics and Dean-Kawasaki equation». *Phys. Rev. E*, 94(4): 42120.

ESCAFF, D. [*et al.*] (2015). «Localized vegetation patterns, fairy circles, and localized patches in arid landscapes». *Phys. Rev. E*, 91(2): 30–32.

FERNANDEZ-OTO, C. [*et al.*] (2014). «Strong interaction between plants induces circular barren patches: fairy circles». *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.*, 372(2027): 20140009.

GILAD, E. [*et al.*] (2004). «Ecosystem Engineers: From Pattern Formation to Habitat Creation». *Phys. Rev. Lett.*, 93(9): 98105.

VON HARDENBERG, J. [*et al.*] (2001). «Diversity of Vegetation Patterns and Desertification». *Phys. Rev. Lett.*, 87(19): 198101.

HILLE RIS LAMBERS, R. [*et al.*] (2001). «Vegetation Pattern Formation in Semi-Arid Grazing Systems». *Ecology*, 82(1): 50.

KEALY, B. J.; WOLKIND, D. J. (2012). «A Nonlinear Stability Analysis of Vegetative Turing Pattern Formation for an Interaction–Diffusion Plant–Surface Water Model System in an Arid Flat Environment». *Bull. Math. Biol.*, 74(4): 803–833.

KLAUSMEIER, C. A. (1999). «Regular and Irregular Patterns in Semiarid Vegetation». *Science*, 284(5421): 1826–1828.

KLEIN, W. [*et al.*] (1994). «Repulsive potentials, clumps and the metastable glass phase». *Physica A*, 205(4): 738–746.

VAN DE KOPPEL, J. [*et al.*] (2005). «Scale-dependent feedback and regular spatial patterns in young mussel beds». *Am. Nat.*, 165(3): E66–77.

VAN DE KOPPEL, J. [*et al.*] (2006). «Scale-dependent inhibition drives regular tussock spacing in a freshwater marsh». *Am. Nat.*, 168(5): E136–47.

LEFEVER, R.; LEJEUNE, O. (1997). «On the origin of tiger bush». *Bull. Math. Biol.*, 59(2): 263–294.

LIKOS, C. N. [*et al.*] (2007). «Why do ultrasoft repulsive particles cluster and crystallize? Analytical results from density-functional theory». *J. Chem. Phys.*, 126(22): 1–18.

LIU, Q. X. [*et al.*] (2013). «Phase separation explains a new class of self-organized spatial patterns in ecological systems». *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 110(29): 11905–10.

LIU, Q. X. [*et al.*] (2016). «Phase separation driven by density-dependent movement: A novel mechanism for ecological patterns». *Phys. Life Rev.*, 19: 107–121.

MARTÍNEZ-GARCÍA, R. [*et al.*] (2014). «Minimal mechanisms for vegetation patterns in semiarid regions». *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys.*, 372: 20140068.

MARTÍNEZ-GARCÍA, R. [*et al.*] (2015). «Pattern Formation in Populations with Density-Dependent Movement and Two Interaction Scales». *PLoS ONE*, 10: e0132261.

MARTÍNEZ-GARCÍA, R. [*et al.*] (2013). «Vegetation pattern formation in semiarid systems without facilitative mechanisms». *Geophys. Res. Lett.*, 40: 6143–6147.

MARTÍNEZ-GARCÍA, R. [*et al.*] (2013). «Spatial patterns in mesic savannas: The local facilitation limit and the role of demographic stochasticity». *J. Theor. Biol.*, 333: 156–165.

MERON, E. (2018). «From Patterns to Function in Living Systems: Dryland Ecosystems as a Case Study». *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 9: 79–103.

MERON, E. (2016). «Pattern formation - A missing link in the study of ecosystem response to environmental changes». *Math. Biosci.*, 271: 1–18.

MERON, E. [*et al.*] (2004). «Vegetation patterns along a rainfall gradient». *Chaos Solitons Fractals*, 19(2): 367–376.

MLADEK, B. M. [*et al.*] (2006). «Formation of polymorphic cluster phases for a class of models of purely repulsive soft spheres». *Phys. Rev. Lett.*, 96(4): 3–6.

MURRAY, J. D. (2002). *Mathematical biology. Vol II.*, Springer.

PIGOLOTTI, S. [*et al.*] (2007). «Species Clustering in Competitive Lotka–Volterra Models». *Phys. Rev. Lett.*, 98(25): 258101.

PRINGLE, R. M.; TARNITA, C. E. (2017). «Spatial self-organization of ecosystems: integrating multiple mechanisms of regular-pattern formation». *Annu. Rev. Entomol.*, 62: 356–77.

RIDOLFI, L. [*et al.*] (2011). *Noise-induced phenomena in the environmental sciences*, Cambridge University Press.

RIETKERK, M. [*et al.*] (2004). «Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems». *Science (New York, N.Y.)*, 305(5692): 1926–9.

RIETKERK, M. [*et al.*] (2002). «Self-Organization of Vegetation in Arid Ecosystems». *Am. Nat.*, 160(4): 524–530.

RIETKERK, M.; VAN DE KOPPEL, J. (2008). «Regular pattern formation in real ecosystems». *Trends Ecol. Evol.*, 23(3): 169–175.

RUIZ-REYNÉS, D. [*et al.*] (2017). «Fairy circle landscapes under the sea». *Science Advances*, 3: e1603262.

SCHEFFER, M.; CARPENTER, S. R. (2003). «Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation». *Trends Ecol. Evol.*, 18(12): 648–656.

SCHEFFER, M.; VAN NES, E.H. (2006). «Self-organized similarity, the evolutionary emergence of groups of similar species». *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. of Sciences of the United States of America*, 103(16): 6230–6235.

SITEUR, K. [*et al.*] (2014). «Beyond Turing: The response of patterned ecosystems to environmental change». *Ecol. Complex.*, 20: 81–96.

SOLÉ, R. V.; BASCOMPTE, J. (2006). *Self-organization in complex ecosystems*, Princeton University Press.

TARNITA, C. E. [*et al.*] (2017). «A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns». *Nature*, 541(7637): 398–401.

TURING, A. M. (1952). «The chemical basis of morphogenesis». *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, 237(641): 37–72.

VICSEK, T.; ZAFFEIRIS, A. (2012). «Collective motion». *Physics Reports*, 517(3): 71–140.

Els models en l'ecologia del plàncton marí: una revisió

Jordi Solé i Ollé

Departament d'Oceanografia Física i Tecnològica, Institut de Ciències del Mar, CSIC.

Correspondència: Jordi Solé i Ollé, Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Pg. Marítim de la Barceloneta, 37–49, Barcelona 08003. Adreça electrònica: jsole@icm.csic.es.

DOI: 10.2436/20.1501.02.180
ISSN (ed. impresa): 0212-3037
ISSN (ed. digital): 2013-9802
<http://revistes.iec.cat/index.php/TSCB>
Rebut: 12/01/2018
Acceptat: 26/04/2018

Resum

Durant les darreres dècades l'ús de models per a la investigació en l'ecologia del plàncton marí s'ha anat fent més habitual i necessari. Els models, actualment, són una peça clau en la recerca, tant pel que fa a l'estudi de processos biològics o interaccions fisicobiològiques, com per fer prediccions o estimacions de la clorofil·la o la producció primària de l'oceà en determinades zones geogràfiques i durant un cert lapse de temps. Els models són també eines imprescindibles per gestionar eficientment l'impacte antropogènic o del canvi climàtic en els ecosistemes. Una possible classificació dels models utilitzats a l'ecologia del plàncton és dividir-los entre models mecanicistes i models estadístics o empírics. En aquest treball, es fa una breu revisió de les principals contribucions en la modelització dels ecosistemes planctònics tenint en compte aquesta classificació, posant-ne, a més, alguns exemples i explicant els pros i contres de cadascun d'aquests tipus de models. Finalment, es plantegen les principals qüestions i àrees d'estudi actuals, quin pot ser el futur desenvolupament dels models i els reptes que cal afrontar per avançar en la modelització, no només en l'ecologia del plàncton, sinó en els models ambientals fisicobiològics en general.

Els models ecològics oceànics han esdevingut una eina molt important tant per fer recerca bàsica com per fer prediccions, recomanacions de polítiques o gestió ambiental (Rose *et al.*, 2010). Tot i la seva efectivitat, els nous coneixements sobre el funcionament dels ecosistemes, la seva estructura, la genètica dels organismes i un major nombre de dades (amb sèries temporals amb més freqüència i més llargues) fa que calguin nous mètodes dins el camp de la modelització dels ecosistemes oceànics (Holt *et al.*, 2014; Lindemann *et al.*, 2017). De tots els models que actualment tenim en la recerca i la gestió dels ecosistemes marins, en podem fer una classificació en dos tipus generals: models mecanicistes i models estadístics o empírics (Robson, 2014).

Els models mecanicistes es coneixen també com a models basats en processos, models basats en la física, models biogeoquímics, causals o fisiològics. Els models mecanicistes pretenen representar l'ecosistema mitjançant re-

lacions funcionals matemàtiques (sistemes d'equacions) entre variables seleccionades (que es prenen com a característiques del sistema). Si ens fixem en el nombre de variables que els models utilitzen, podríem classificar-los, al seu torn, en dos tipus: els models de baixa dimensionalitat (per exemple, fins a quatre variables), o models matemàtics, i els models d'alta dimensionalitat (per exemple, a partir de cinc variables), o models numèrics (Sharpe, 1990). En els models mecanicistes, tradicionalment, els que utilitzen grups funcionals han estat dels més freqüentment emprats en la recerca dels ecosistemes planctònics i són els que han estat acoblats als models de circulació (Fennel *et al.*, 2011). Els grups funcionals proposen variables que tenen en compte la funcionalitat d'un organisme en relació amb d'altres. Així, per exemple, en els models de baixa dimensionalitat tenim les variables Nutrient, Fitoplàncton, Zooplàncton (NPZ de les sigles en anglès, Franks, 2002). Si

anem a models numèrics podem posar com a exemple els models ERSEM (Butenschön, M. *et al.*, 2016) o el Nemuro (Kishi *et al.*, 2011). Els models mecanicistes són útils quan tenim un conjunt d'hipòtesis sobre les quals podem proposar equacions deterministes. El problema bàsic al qual ens enfrontem amb aquests tipus de models és que, com més precisió del model requerim, creix el nombre de variables a tractar i, amb elles, el nombre de paràmetres associats a les funcions que les relacionen. Tenint en compte això, caldrà calibrar-los, fent anàlisis estadístiques (de sensibilitat) per tal que les solucions que ens doni el model proposat no conduixin a sistemes caòtics (sense solució). La selecció d'aquests models, doncs, dependrà de si el model ens és útil per entendre relacions causals o tenim prou informació (en nombre de dades per les variables seleccionades o pels valors dels paràmetres del model) per poder resoldre el model. Una comparativa de diferents models mecanicistes la podeu tro-

bar a Shimoda i Arhonditsis (2016), que comparen 124 models biogeoquímics en la seva capacitat de reproduir la dinàmica dels grups funcionals de fitoplàncton. Els resultats mostren que, tot i que s'ha avançat, encara falta millorar els estudis de sensibilitat sobre les parametritzacions perquè aquestes no s'utilitzen encara de manera prou general en tots els models i cal considerar tècniques d'optimització durant la calibració del model. És a dir, moltes de les parametritzacions dels models encara es basen en suposicions *ad hoc* que, un cop implementats els models, se solen donar per correctes, fins i tot en simulacions que s'allunyen de les condicions òptimes amb les quals els valors del conjunt de paràmetres s'havien escollit. Per tant, cal estandarditzar algun conjunt de procediments per establir límits d'aplicació de paràmetres i, fins i tot, de funcions utilitzades per representar grups funcionals, en la mateixa línia del que ja va fer Gentleman (2003).

Un exemple de model mecanicista per trobar efectes en la mida dels organismes és el publicat per Acevedo-Trejos *et al.* (2015). En aquest treball utilitzen un model mecanicista senzill per estudiar els factors ambientals que condicionen la mida de les cèl·lules de plàncton i la seva diversitat en la comunitat planctònica en regions tropicals o temperades de l'Atlàntic.

Pel que fa als models estadístics o empírics, els models bayesians són dels més utilitzats, però també hi podem incloure, en aquest tipus, els models regressius, els models basats en xarxes neuronals o en algorismes genètics. Els models bayesians utilitzen probabilitat inversa per poder determinar variables, adaptar els models i fer prediccions. Es basen en la regla de Bayes, que ens diu com fer inferències sobre un conjunt d'hipòtesis usant-ne les dades. Com a inferència podem entendre tant aprenentatge com predicció. Els models regressius es basen en l'ajust de funcions matemàtiques (normalment polinomis) a partir del conjunt de dades. Les xarxes neuronals són sistemes de connexió inspirada en el funcionament de les neurones del cervell. En aquests sistemes, els nodes (neurones) es connecten entre si seguint un criteri determinat. Cada xarxa neuronal rep una entrada, canvia el seu estat depenent d'aquesta i produeix una sortida. Aquest procés condueix a poder fer que la xarxa aprengui i identifiqui patrons, produint, per exemple, la mateixa sortida (identificació d'un patró) per diferents entrades (dades sobre les quals volem identificar aquest patró).

Els algorismes genètics estan inspirats en la teoria de la selecció natural, troben solucions optimitzades a determinats problemes en què se cerca la millor opció en un espai de solucions possibles al problema proposat. Els algorismes genètics formen part del que es coneix com a algorismes evolutius.

Aquests tipus de models, en lloc de desenvolupar sistemes d'equacions i relacions causa-efecte com els mecanicistes, el que pretenen és trobar patrons en les dades experimentals per poder fer prediccions partint d'aquestes dades. Així doncs, l'avantatge d'aquest tipus de modelització és que no requereix una assumpció excessiva d'hipòtesis de partida ni haver de tenir informació sobre les diferents parametritzacions que hi hagi en el model; tampoc no cal calcular variables mitjanes o derivades a partir de les dades experimentals de què disposem. Per tant, aquests models seran una bona opció en cas que tinguem prou

dades per delimitar convenientment el model, i que, a més, el sistema estigui dins del comportament històric mostrat per les dades disponibles. Aquests tipus de models no donaran bons resultats en el cas que hi hagi retroalimentacions grans en les variables mostrejades. És a dir, els models estadístics no ens seran útils en sistemes fortament no-lineals a prop d'una transició o en una transició mateixa. Amb aquestes condicions ja veiem que els models empírics no ens serviran per fer prediccions en sistemes que tinguin canvis sobtats, per exemple a causa d'impactes grans en l'ecosistema de factors ambientals que no hagin sigut mostrejats abans en el conjunt de dades aplicat. Els models estadístics, però, són eines molt interessants quan el sistema a estudiar no s'entén prou bé i poden ser un primer pas per construir un model mecanicista (Robson, 2014).

Models del plàncton

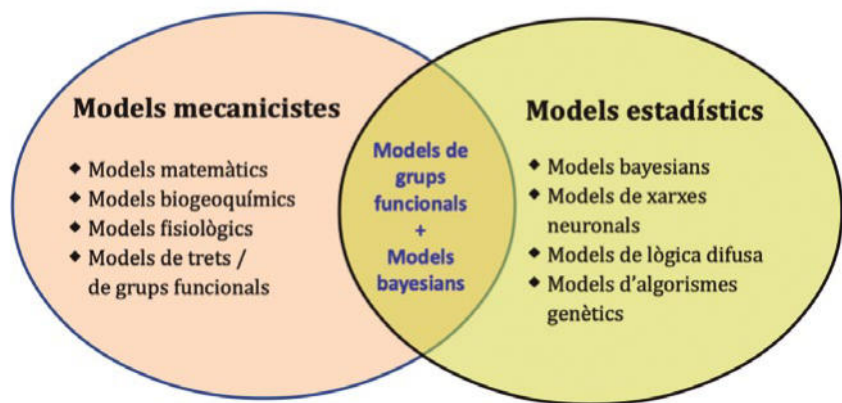


Figura 1. Els tipus de models del plàncton.

Un exemple de model empíric seria el de la xarxa tròfica planctònica proposat per Lignell *et al.* (2013) per estimar l'afinitat osmotròfica per nitrogen inorgànic i els valors de depuració de presa amb un model bayesià, basat en els mètodes de Monte Carlo i les cadenes de Markov.

D'altra banda, hi ha hagut comparatives de les dues tipologies de models. Una de les poques anàlisis en aquesta direcció va ser la d'Altunkaynak i Wang (2011). En el seu estudi

van comparar un model hidrodinàmic que simulava el sediment en suspensió en una àrea costanera (mecanicista) amb un mètode d'algorismes genètics amb filtre de Kalman (*Geno-Kalman filtering*: model empíric) i un model de lògica difusa (empíric). Els resultats van donar més precisió en el model de *Geno-Kalman filtering*, seguit del de lògica difusa i, finalment, del model hidrodinàmic (tenint en compte l'error quadràtic mitjà i el coeficient d'eficiència comparant els resultats dels mo-

dels amb les observacions). Malgrat tot, els autors van escriure que, tot i ser més acurats, els models estadístics són menys flexibles en el rang de prediccions que poden generar.

Un exemple de l'ús d'ambdós tipus de models combinats és el de Norros *et al.* (2017). Aquests autors utilitzen un model bayesià per estimar els paràmetres d'un model mecanicista i, així, millorar-ne els resultats. En el seu estudi proven diferents metodologies d'estimació estadística dels paràmetres i troben que el mètode d'anàlisi bayesià jerarquitzat és el que produeix millors resultats degut a la seva capacitat de comparar informació de diferents conjunts de dades. Conclouen que les anàlisis bayesianes jeràrquiques són una eina amb projecció en el futur per poder identificar paràmetres clau en els ecosistemes i la seva variabilitat.

Un cop s'han introduït els dos tipus bàsics de models cal fer una breu explicació dels principals camps de recerca actuals en la modelització dels ecosistemes planctònics. D'entre les moltes contribucions que podem trobar en la nombrosa literatura sobre el tema es podrien destacar les següents tendències i línies de recerca (Robson, 2014):

- S'estan fent esforços per intentar definir estàndards sobre quines serien les bones pràctiques en la modelització (Bennett *et al.*, 2013).
- Es va cap a una major integració dels models en les diferents àrees d'estudi. Per exemple, es pretén connectar models de rius, d'estuaris i d'oceà amb models de pesca. També s'implementen en els models ambientals factors econòmics i socials. Tot i que la connexió de models ja fa molts anys que s'aplica, actualment s'està fent un esforç més gran, amb projectes més ambiciosos.
- Es va incrementant l'operacionalitat dels models connectats. Entenem operacionalitat com l'activitat rutinària d'adquirir mesures oceàniques o atmosfèriques sistemàticament durant llargs períodes de temps i interpretar-les i disseminar-les ràpidament. Així doncs, es van posant els resultats al web, automatitzant els diferents processos de pre i postprocessat de les dades dels models, etc. (Voinov i Shurgart, 2013).
- S'optimitza l'assimilació de dades. Amb assimilació de dades entenem les tècniques que ens permeten corregir els models per apropar-los a les observacions fetes en el passat, ajustant o bé les condicions inici-

als o bé les parametritzacions del mateix model. Mitjançant aquestes tècniques es pot millorar la predicció dels models corregint-los amb les dades mostrejades (de sensors *in situ* o de satèl·lit) (Margvelashvili *et al.*, 2010; Edwards *et al.*, 2015).

- Es fa desenvolupament i aplicació de millors tècniques i eines més eficaces per fer anàlisis de sensibilitat dels models complexos (numèrics) i per avaluar la seva precisió i adequació al problema que es pretén analitzar (Bennett *et al.*, 2013).

El futur requereix analitzar els grans reptes que es plantegen en la humanitat en el terreny ambiental; així doncs, tenint en compte aquestes línies de recerca, l'ús de models per avaluar els impactes del canvi climàtic en les activitats humanes i en els ecosistemes (Lynam *et al.*, 2016) i suggerir possibles estratègies de mitigació i adaptació (IPCC, 2014) és clau en la recerca futura. En els successius informes del Panell Intergovernamental pel Canvi Climàtic (IPCC) es veu una tendència cada cop més manifesta en l'ús dels models en diferents àrees per avaluar els impactes del canvi climàtic i les possibilitats d'adaptació (això es pot veure per exemple en la part de previsions de l'informe de l'IPCC, 2014). En aquest sentit, la integració de dades mostrejades, l'ús de nous indicadors i els models cal que avancin trobant sinergies i connexions per extreure el millor de cada metodologia. Per aconseguir aquest objectiu caldrà, entre d'altres:

- fer un esforç per veure quines són les millors estratègies per reduir la incertesa en les prediccions dels models. Una de les preguntes que es plantegen sobre aquesta qüestió és si és millor utilitzar poques variables / pocs indicadors per tal de tenir una visió general de tendències i evolució del sistema d'estudi, o bé fer servir més variables per tenir una descripció més acurada d'interaccions i processos. Això ens porta al compromís entre l'increment de dimensionalitat (nombre de variables del model) per tenir una predicció més completa, la qual cosa incrementa la seva complexitat i, per tant, també la propagació de l'error en la predicció, o bé tenir models més simples però amb una incertesa menor en la determinació dels paràmetres, a costa d'una descripció menys detallada del sistema d'estudi;
- en relació amb el punt anterior, cal identificar les variables clau o principals/repre-

sentatives dels ecosistemes a estudiar (Constable *et al.*, 2016; Hayes *et al.*, 2015);
— finalment, cal definir criteris per tal de generalitzar les funcionalitats i parametritzacions fetes en estudis geogràficament locals i, a la inversa, com des de models més generalistes es pot particularitzar a estudis més locals.

Totes aquestes qüestions necessiten procediments estàndards i la definició de mètriques que indiquin el grau de precisió de les prediccions i els resultats dels models respecte de les dades mostrejades.

Per acabar, una qüestió d'extrema importància per a la millora dels models és que tant els revisors com els editors de les revistes comencin a canviar de criteri pel que fa a la publicació d'articles. És necessari que es comencin a publicar, a més dels articles convencionals, en què les anàlisis i els models donen resultats satisfactoris i positius, els estudis que troben resultats que no s'ajusten a les observacions, posant de relleu les mancances dels models utilitzats. Només publicant la informació referent a allò que els models no fan bé i quins són els seus límits, podrem avançar en aquest camp de manera eficient (Robson, 2014). Si no ho fem així, correm el risc d'invertir temps en l'exploració repetitiva amb eines poc adients i de repetir errors que ja han trobat d'altres, però que, pel criteri actual de publicació, no han pogut explicar en una revista especialitzada. Cal, doncs, començar a canviar, sobretot, la manera en què la recerca en modelització s'explica en i a la comunitat científica.

Agraïments

L'autor agraïeix als revisors d'aquest article i als editors (Mariona Segura i Òscar Guadayol) les seves aportacions i els seus suggeriments, que han contribuït a millorar l'article.

Bibliografia

ACEVEDO-TREJOS, E. [et al.] (2015). «Mechanisms shaping size structure and functional diversity of phytoplankton communities in the ocean». *Sci. Rep.* 5: 8918. doi: 10.1038/srep08918.

ALTUNKAYNAK, A.; WANG, K. H. (2011). «A comparative study of hydrodynamic model and expert system related models for prediction of total suspended solids concentrations in Apalachicola Bay». *J. Hydrol.* 400(3-4): 353–363.

BENNETT, N. D. [et al.] (2013). «Characterising performance of environmental models». *Environ. Model. Softw.* 40: 1–20.

CONSTABLE, A. J. [et al.] (2016). «Developing priority variables (“ecosystem Essential Ocean Variables” — eEOVs) for observing dynamics and change in Southern Ocean ecosystems». *J. Mar. Syst.* 161: 26–41. doi: 10.1016/j.jmarsys.2016.05.003.

EDWARDS, C. A. [et al.] (2015). «Regional Ocean Data Assimilation». *Ann. Rev. Mar. Sci.* 7(1): 21–42. doi: 10.1146/annurev-marine-010814-015821.

BUTENSCHÖN, M. [et al.] (2016). «ERSEM 15.06: a generic model for marine biogeochemistry and the ecosystem dynamics of the lower trophic levels». *Geosci. Model Dev.* 9: 1293–1339. doi: 10.5194/gmd-9-1293-2016.

FENNEL, K. [et al.] (2011). «A coupled physical-biological model of the Northern Gulf of Mexico shelf: Model description, validation and analysis of phytoplankton variability». *Biogeosciences* 8: 1881–1899. doi: 10.5194/bg-8-1881-2011.

FRANKS, P. J. S. (2002). «NPZ Models of Plankton Dynamics: Their Construction, Coupling to Physics, and Application». *J. Oceanogr.* 58: 379–387. https://doi.org/10.1023/A:1015874028196.

GENTLEMAN, W. [et al.] (2003). «Functional responses for zooplankton feeding on multiple resources: a review of assumptions and biological dynamics». *Deep-Sea Res. II* 50: 2847–2875.

HAYES, K. R. [et al.] (2015). «Identifying indicators and essential variables for marine ecosystems, Ecological Indicators». 57: 409–419. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.006.

HOLT, J. [et al.] (2014). «Challenges in integrative approaches to modelling the marine ecosystems of the North Atlantic: physics to fish and coasts to ocean». *Progr. Oceanogr.* 129: 285–313.

IPCC (2014). «Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change» [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (ed.)]. IPCC, Ginebra, Suïssa, 151 p.

KISHI, M. J. [et al.] (2011). «A review of the NEMURO and NEMURO.FISH models and their application to marine ecosystem investigations». *J. Oceanogr.* 67(1): 3–16.

LIGNELL, R. [et al.] (2013). «Getting the “right” parameter values for models of the pelagic microbial food web». *Limnol. Oceanogr.* 58(1): 301–313.

LINDEMANN, C. [et al.] (2017). «Editorial: Modeling the Plankton—Enhancing the Integration of Biological Knowledge and Mechanistic Understanding». *Front. Mar. Sci.* 4:358.

LYNAM, C. P. [et al.] (2016). «Uses of Innovative Modeling Tools within the Implementation of the Marine Strategy Framework Directive». *Front. Marine Sci.* 3:182. doi: 10.3389/fmars.2016.00182

MARGVELASHVILI, N. [et al.] (2010). «Development of operational data-assimilating water quality modelling system for South East Tasmania». In: *OCEANS 2010 IEEE-sydney*. IEEE: 1–5.

NORROS, V. [et al.] (2017). «Parameterization of aquatic ecosystem functioning and its natural variation: Hierarchical Bayesian modelling of plankton food web dynamics». *J. Mar. Syst.* 174: 40–53.

ROBSON, B. J. (2014). «When do aquatic systems models provide useful predictions, what is changing, and what is next?» *Environ. Model. Softw.* 61: 287–296. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.01.009.

ROSE, K. A. [et al.] (2010). «End-to-end models for the analysis of marine ecosystems: challenges, issues, and next steps». *Marine Coast. Fish.* 2: 115–130. doi: 10.1577/C09-059.1

SHARPE, P. J. (1990). *Forest modeling Approaches: Compromises between Generality and Precision, Process Modeling of Forest Growth Responses to Environmental Stress*. Timber Press, Portland, OR: 180–190.

SHIMODA, J.; ARHONDITSIS G. B. (2016). «Phytoplankton functional type modelling: Running before we can walk? A critical evaluation of the current state of knowledge». *Ecol. Modell.* 320: 29–43.

VOINOV, A.; SHUGART, H. H. (2013). «‘Integronsters’, integral and integrated modeling». *Environ. Model. Softw.* 39: 149– 158.

Corrents i ecosistemes oceànics com a subsistemes d’un organisme planetari

Josep L. Pelegrí

Departament d’Oceanografia Física i Tecnològica, Institut de Ciències del Mar, CSIC.

Correspondència: Josep Lluís Pelegrí. Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC), Pg. Marítim de la Barceloneta, 37–49, Barcelona 08003. Adreça electrònica: pelegri@icm.csic.es.

DOI: 10.2436/20.1501.02.181
ISSN (ed. impresa): 0212-3037
ISSN (ed. digital): 2013-9802
<http://revistes.iec.cat/index.php/TSCB>
Rebut: 21/01/2018
Acceptat: 19/04/2018

Resum

Els oceans són origen i instrument per a la vida del planeta que, paradoxalment, anomenem Terra. Els oceans guarden la major part de l’aigua i altres propietats que flueixen en el cicle de la vida, totes elles condicionades per l’energia que ens ve del Sol. Aquesta insolació arriba a les aigües superficials en funció de la latitud i el temps, i s’incorpora i distribueix pels oceans en forma de calor i energia mecànica i química. Durant els processos d’incorporació i transformació, es defineixen les condicions termodinàmiques i dinàmiques dels hàbitats regionals, que donen peu a característiques biogeoquímiques i comunitats pròpies, i són els corrents oceànics els que, amb tot un ventall de patrons temporals i d’estructures espacials, conformen un sistema circulatori anàleg al d’altres éssers vius. S’estableix una xarxa complexa de subsistemes amb tasques complementàries: sorgeix el gran organisme planetari!

Ocean ecosystems and currents as subsystems of a planetary organism

Abstract

The oceans are origin and instrument for the life of a planet that, paradoxically, we call Earth. The oceans keep most of the water and other properties that flow in the cycle of life, all of them conditioned by the energy that comes from the Sun. This insolation reaches the surface waters according to latitude and time, and it is incorporated and distributed through the oceans as heat and mechanical and chemical energy. During the processes of incorporation and transformation, the thermodynamic and dynamic conditions of the regional habitats are defined, which give rise to biogeochemical properties and typical communities, and the ocean currents, with a broad range of temporal patterns and spatial structures, shape a circulatory system analogous to other living organisms. A complex network of subsystems with complementary tasks is established: the great planetary organism emerges!

Una perspectiva planetària

L’objectiu d’aquest assaig és plantejar la conveniència de veure els diferents ambients marins com un tot, connectat i diferenciat alhora, de la mateixa manera que podríem observar el sistema circulatori d’un ésser viu. Es tracta d’una perspectiva molt personal que crec que pot obrir sinergies sorprenents i, alhora, enriquidores —només imagineu-vos un oceanògraf com ara jo pensant en termes del sistema circulatori d’un artròpode o un especialista en fisiologia de les plantes fent servir la Terra com a model. Ara bé, entenc que és un punt de vista que pot ser polèmic, i és per això que dedico les dues primeres seccions d’aquest assaig a exposar els avantatges i, fins i tot, la necessitat d’aquesta aproximació.

La nostra concepció de la Terra està necessàriament limitada per la nostra quotidianitat, tant des de la percepció diària de l’espai i el temps on ens movem com des de la visió utilitària que el món globalitzat ens ofereix del planeta. El flux d’informació que rebem no para

de créixer i això ens porta a una sensació d’objectivitat, però res és més lluny de la realitat! La nostra percepció del món és el resultat, d’una banda, de les limitacions temporals dels nostres sentits i, de l’altra, de la fragmentada memòria conscient i inconscient que tenim de les nostres vivències.

El principal condicionant de la nostra experiència personal diària ve donat per la nostra percepció de la realitat, que es desenvolupa principalment en aquells rangs on els estímuls són més forts. La visió n’és potser el millor exemple, un sentit optimitzat en la banda més intensa de l’espectre electromagnètic que ens arriba del Sol, però que revela la nostra incapacitat de percebre (si més no de manera conscient) altres senyals electromagnètics més febles. Aquest biaix s’ha reduït, però no eliminat, mercès al desenvolupament d’instruments que capten altres freqüències de les formes conegudes d’energia. Ara bé, la nostra individualitat també és, en gran mesura, funció de les nostres escales espaciotemporals. Per exemple,

fem servir el metre i el segon, similars a la llargada i el temps de batec d’un cos humà, com les unitats fonamentals de mesura. La nostra capacitat objectiva de mesurar l’espai i el temps —la memòria del nostre entorn— és realment restringida. Si calculéssim l’autocorrelació temporal de les nostres opinions i sentiments veuríem que, en la gran majoria dels casos, hi ha una escala probablement de l’ordre d’uns pocs anys. De la mateixa manera, la correlació espacial de les opinions de la gent segurament és de l’ordre de centenars de quilòmetres.

Aquestes limitacions condueixen a una forta consciència d’identitat personal, que comporta un gran fre a la nostra capacitat de pensar i imaginar la Terra. El món que ens imaginem no és pas el resultat d’una observació objectiva, sinó l’imaginari d’una llarga història d’experiències individuals i col·lectives, reforçada encara més per la subjectivitat que sorgeix de veure’ns com a raça dominant del planeta, al bell mig de tot el que és viu. Prova-